

含水合物粉质黏土压裂成缝特征实验研究<sup>1)</sup>杨 柳<sup>\*,†</sup> 石富坤<sup>\*</sup> 张旭辉<sup>†,\*\*,2)</sup> 鲁晓兵<sup>†,\*\*</sup><sup>\*</sup>(中国矿业大学(北京)深部岩土力学与地下工程国家重点实验室,北京 100083)<sup>†</sup>(中国科学院力学研究所流固耦合系统力学重点实验室,北京 100190)<sup>\*\*</sup>(中国科学院大学,北京 100190)

**摘要** 水力压裂技术是一种重要的油气井增产、增注措施,已经广泛应用于页岩油气等非常规资源的商业开采中。目前对于粉质黏土水合物沉积物的水力压裂成缝能力尚不清楚。本文采用南海水合物沉积层的粉质黏土制备沉积物试样,并与实验室配制的粉细砂土沉积物对比,分析粉质黏土沉积物的水力成缝能力及主控因素。实验结果表明含水合物和冰的沉积物破裂压力较高,这与粉质黏土沉积物特殊的应力-应变特征和渗透性有关。当沉积物应变高于 6% 时,试样强度迅速上升,呈现应变强化的特征,对水力拉伸裂缝的扩展具有一定的阻碍作用。粉质黏土沉积物粒径细小,渗透性差,难以通过渗透作用传递压力,提高了沉积层的破裂压力。此外,粉质黏土水合物沉积层裂缝扩展存在明显延迟效应,说明裂缝扩展受到流体压力和热应力的共同影响。适当延长注入时间,保持流体与沉积层充分接触,会起到分解水合物、降低破裂压力的作用。该研究成果有利于深入理解水力裂缝在水合物沉积层中的扩展规律,对探索压裂技术在水合物沉积层开发中的应用具有重要意义。

**关键词** 粉质黏土水合物,压裂,裂缝扩展,破裂压力,温度

中图分类号: TE348 文献标识码: A doi: 10.6052/0459-1879-19-179

EXPERIMENTAL STUDIES ON THE PROPAGATION CHARACTERISTICS OF HYDRAULIC FRACTURE IN CLAY HYDRATE SEDIMENT<sup>1)</sup>Yang Liu<sup>\*,†</sup> Shi Fukun<sup>\*</sup> Zhang Xuhui<sup>†,\*\*,2)</sup> Lu Xiaobing<sup>†,\*\*</sup><sup>\*</sup>(State Key Laboratory for Geomechanics and Deep Underground Engineering, China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing 100083, China)<sup>†</sup>(Key Laboratory for Mechanics in Fluid Solid Coupling Systems, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)<sup>\*\*</sup>(University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

**Abstract** Hydraulic fracturing technology is an important oil and gas well stimulation measure, which has been widely used in commercial development of unconventional resources such as shale oil and gas. The propagation characteristics of hydraulic fracture is not well known in hydrate sediment. In this study, the hydrate sediment samples are prepared, and the influencing factors are analyzed. The experimental results show that the breakdown pressure of hydrate sediment sample and hydrate-ice sediment sample is much larger, which is related to the special stress-strain characteristics and water permeability. When the strain of silty sediment is higher than 6%, the strength rises rapidly to present the characteristics

2019-07-07 收稿, 2019-12-28 录用, 2019-12-30 网络版发表。

1) 国家自然科学基金项目(11702296)和中国科学院青年创新促进会项目(2017027)资助。

2) 张旭辉, 副研究员, 主要研究方向: 非常规油气开发中的工程科学问题研究。zhangxuhui@imech.ac.cn

引用格式: 杨柳, 石富坤, 张旭辉, 鲁晓兵. 含水合物粉质黏土压裂成缝特征实验研究. 力学学报, 2020, 52(1): 224-234

Yang Liu, Shi Fukun, Zhang Xuhui, Lu Xiaobing. Experimental studies on the propagation characteristics of hydraulic fracture in clay hydrate sediment. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2020, 52(1): 224-234

of strain hardening. It has a certain hindrance to the expansion of hydraulic tensile fractures. The silty sediment is composed of small particle and characterized by poor permeability. It is difficult for water to rapidly transfer pressure, thereby increasing the breakdown pressure. In addition, there is a significant delay effect on the fracture propagation of silty sediment sample, indicating that the fractures extend under the combined action of fluid pressure and thermal stress. Extending the injection time contributes to heating and decomposing the hydration. The research results are helpful for understanding the propagation law of hydraulic fractures in hydrate sediments. It is of great significance to explore the application of fracturing technology in the development of hydrate sediments.

**Key words** gas hydrate, hydraulic fracturing, fracture propagation, breakdown pressure, temperature

## 引言

天然气水合物是在低温高压条件下形成的一种冰状晶体, 主要赋存于砂土和粉质黏土沉积层中, 富含极其丰富的天然气,  $1 \text{ m}^3$  的水合物沉积层能够释放出  $160\sim 200 \text{ m}^3$  的天然气<sup>[1-2]</sup>. 已探明的天然气水合物沉积层绝大部分存在于海底, 少部分分布在陆地的冻土层内和深水湖底<sup>[3]</sup>. 研究发现, 天然气水合物分布广泛, 资源量高, 其储量相当于传统化石能源燃料的 2 倍左右, 是一种储量巨大的非常规天然气资源<sup>[4-5]</sup>. 我国分别在祁连山冻土层和南海沉积层取得了优质的水合物沉积物样品, 说明我国的水合物储量丰富、丰都高、开采潜力巨大, 目前已经水合物开采方面的研究列入国家重点研究规划<sup>[6]</sup>. 天然气水合物作为一种新型的清洁能源, 开采效率的提高对全球环境保护、缓解能源危机具有重要意义<sup>[7]</sup>.

天然气水合物具有广阔的勘探开发前景, 受到国内外众多学者的广泛关注, 目前主要围绕水合物开采方法、技术及工艺等方面开展研究<sup>[8-9]</sup>. 与常规的化石能源不同, 水合物的开采存在较大的特殊性, 具体表现为开采条件特殊、分解需要热量大、地层稳定性低和天然气易泄漏<sup>[10]</sup>. 水合物赋存于高压、低温的环境下, 需要通过供热或降压引起水合物分解从而获得天然气. 然而, 单纯依靠水合物沉积层自身的热量是远远不够的, 必须从外界输入大量的热量使得水合物充分分解<sup>[11]</sup>. 水合物沉积物作为骨架结构的一部分, 分解后会导致地层强度大幅度降低、孔隙压力剧烈变化, 对井筒、地层的稳定性带来较大威胁<sup>[12]</sup>. 此外, 水合物沉积层往往处于未固结状态、渗透性好, 释放出的天然气易沿着盖层的高渗通道发生窜流、泄漏. 水合物沉积层的这些特点为水合物的开采带来较大挑战, 很大程度上限制了天然气水合物的高效开发<sup>[13-14]</sup>. 目前, 适用于水合物开采

的方法主要包括降压法、供热法、抑制剂法、置换法、固体法以及多种方法联合法, 这些方法普遍存在传热速率低、水合物开采效率慢等特点<sup>[15-17]</sup>. 张旭辉等<sup>[18]</sup>提出了一种机械粉碎与加热联合的水合物开采设想, 不仅避免了大量的固体颗粒举升带来的能量损耗, 还可以通过固体颗粒回填降低了沉积层坍塌的风险. 与传统的方法相比, 这种方法克服了传统方法中传热慢、分解效率低等缺点, 适用于分布集中、丰度高、储量大、未固结的水合物沉积层中.

水合物沉积物的开采方法的关键是大幅度提高水合物沉积层的渗流能力、扩大水合物的分解范围. 俄罗斯学者提出水平井多级压裂技术依靠高压流体诱发人工裂缝, 可以改善地层的渗流通道, 在水合物开采中具有很大的应用前景<sup>[19]</sup>. 郑哲敏<sup>[20]</sup>提出了水合物沉积层水平井压裂面临的一系列工程科学问题, 认为水力压裂的优势主要体现在两个方面: 一方面注入的压裂液往往温度高于地层, 与水合物沉积层接触后, 促进水合物分解、释放天然气; 另一方面压裂产生的裂缝可提高压裂液与水合物沉积层的接触面积, 利于水合物大范围分解. 此外, 裂缝可作为天然气的高速通道, 提高水合物气井的产量. 邵茹<sup>[21]</sup>设计了一种双水平井多级压裂开采水合物的方案, 一口水平井作为压裂井, 另外一口作为采气井. 通过压裂井注入热流体促进水合物沉积层分解, 从采气井开采分解出的天然气. 祝道平等<sup>[22]</sup>提出将高能气体压裂技术应用于水合物开采的设想, 高压气体可作用于地层上引起裂缝扩展, 提高地层的导流能力. 同时, 高温气体在一定程度上起到了供热作用, 促进了水合物的分解<sup>[23-25]</sup>. 高能气体压裂技术可与传统的开采方法结合, 达到强化水合物开采效率的目的. 然而, 将水力压裂技术应用于水合物开发尚处于理论研究阶段, 其他配套的技术如工作液配方、井壁稳定、固井及排采技术有待于进一步研究<sup>[26]</sup>. 综合来看, 水

力压裂技术对改善地层渗流能力和扩大水合物的分解范围都有重要作用,是一种潜在的水合物高效开采技术。

目前,水力压裂技术已经广泛的应用于页岩油气等非常规资源的开采中,使得北美页岩油气进入了大规模高效开发阶段.该技术的成功应用与页岩本身的特殊性有关.我国南海粉质黏土水合物沉积物主要由黏土矿物、水合物和冰组成,与页岩的矿物组成(黏土矿物和脆性石英矿物)具有一定的相似性.尤其是水合物和冰含量较高,使得水合物沉积物的脆性较强,有利于人工裂缝的起裂、扩展.本文针对我国南海含水合物粉质黏土沉积层的成缝能力开展研究,并与砂土沉积层进行对比,分析沉积物组成、水合物含量及冰对裂缝形态、破裂压力的影响。

## 1 实验样品、设备和步骤

### 1.1 试样制备

实验采用的粉质黏土取自南海水合物区,颗粒比重约为 2.7,相对密度约 58%,直径在 0.005~0.05 mm 范围的颗粒占比约为 80%,颗粒级配曲线如图 1(a) 所示.粉细砂土比重约为 2.68,相对密度为 54%,直径在 0.005~0.05 mm 范围的颗粒占比约 7.8%,颗粒级配曲线如图 1(b) 所示.相比而言,粉质黏土的颗粒直径较小,处于几个微米到几十微米级别.采用粉质黏土和粉细砂制备土样,即为水合物赋存的沉积物骨架,基本物性参数如表 1 所示.制备的土样直径×高度约为 3.9 cm×8 cm.在制备土样过程中,分四层砸实,可保证土样的均匀性.甲烷水合物在粉质黏土中合成时间长,且饱和度难以控制.而四氢呋喃水合物在热力学性质方面与甲烷水合物具有很强的相似性,在不考虑开采产气的力学性质的研究中能够相互模拟.四氢呋喃水合物在大气压和温度 4℃ 下即可形成,形成条件容易控制,合成难度低.因此,本文采用四氢呋喃水合物开展实验,在降低实验难度的同时,还可以反映出水合物沉积物的成缝特征<sup>[27]</sup>.

研究发现,水合物沉积层具有非均质性强,横向变化大的特点,且部分沉积层同时发育水合物和冰.为了更好地反映水合物沉积层的特征,本实验分别制备三种试样(沉积物骨架试样、水合物沉积物试样和水合物-冰沉积物试样),并对比研究沉积物骨架性质、水合物和冰饱和度对沉积层压裂裂缝延伸的

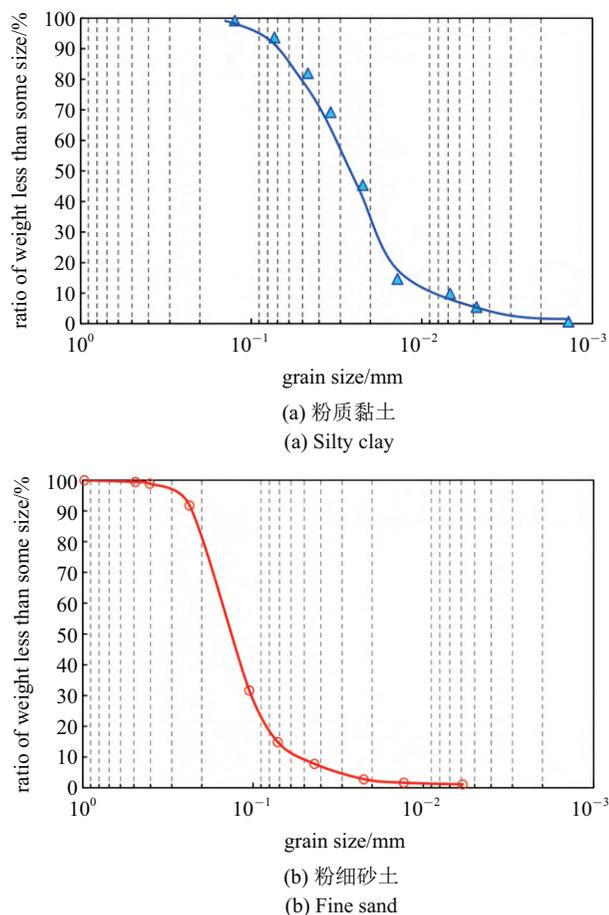


图 1 颗粒级配曲线

Fig. 1 Particle gradation curve

表 1 样品参数

Table 1 Sample parameters

Label	Property	Diameter/ cm	Length/ cm	Dry mass/g	Hydrate saturation/%
Sample 1#		3.91	8.2	63.7	0
Sample 2#	silty sediment	3.92	8.1	73.1	86.6
Sample 3#		3.89	8.0	82.6	86.4
Sample 11#	sandy sediment	3.92	8.0	152.8	0
Sample 22#		3.88	8.3	154.7	86.3
Sample 33#		3.91	8.1	148.5	86.7

影响.沉积物骨架试样(1#和 11#)在自然条件下风干至质量不再变化,即制备成功(图 2(a));水合物沉积物试样是在沉积物骨架试样中注入一定量的四氢呋喃(质量分数为 19%),保持温度 -9℃ 下持续 48 h 以上,即制备成功(图 2(b));水合物-冰沉积物试样是在水合物沉积物基础上制备的,将水合物沉积物试样置于 0℃ 的冰水混合物中,并将环境温度降至 -9℃,持续 5 d 以上,直至样品表面冰层形成(冰层厚度约为 1 cm),试样如图 2(c) 所示。

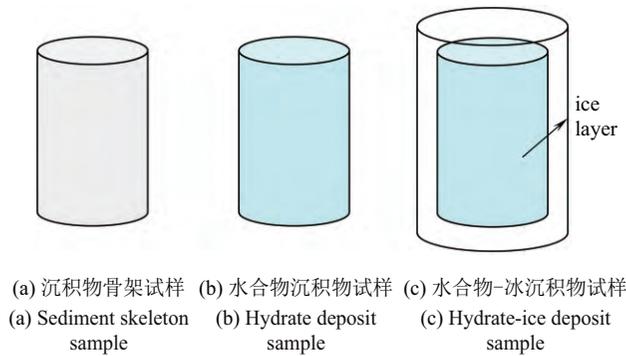


图 2 水合物沉积层试样示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the hydrate deposit sample

### 1.2 试样的基本力学性质

粉质黏土的水合物饱和度约 90%。图 3 为粉质黏土的应力-应变曲线,可以看出应力随着应变的增大呈现三台阶式的增长,曲线具有明显的三段式特征:弹性变形段、塑性变形段及应变硬化段<sup>[28]</sup>。当应变低于 15%时,含水合物的粉质黏土试样表现为线弹性特征;当应变在 2%~6%范围内,含水合物的粉质黏土试样表现为塑性变形特征,即应力基本不变,应变由 2%增大到 6%;当应变高于 6%时,含水合物的

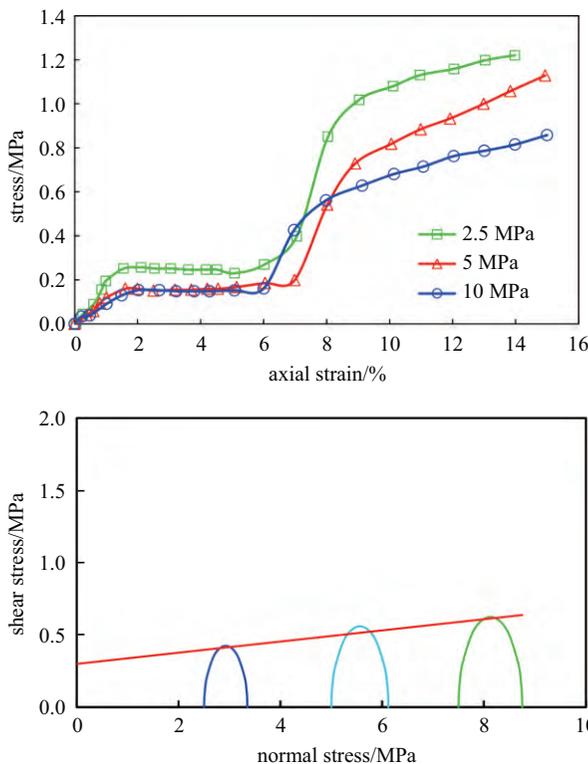


图 3 粉质黏土的应力应变曲线和摩尔圆<sup>[28]</sup>

Fig. 3 Stress-strain curve and molar circle of silty clay<sup>[28]</sup>

粉质黏土试样表现为应变硬化特征,即随着应变增大,应力迅速上升。此外,应变硬化段分为两个阶段,初期段粉质黏土试样表现为均匀变形,应力升高较快;后期段粉质黏土试样表现为局部变形,应力的升高趋势开始放缓。根据库伦莫尔圆可知,随着围压的增大,含水合物的粉质黏土试样强度逐渐增大,内聚力和内摩擦角分别为 0.3 MPa 和 2.21°。

砂土水合物平均饱和度约为 85.3%。图 4 为粉细砂土的应力-应变曲线和莫尔圆<sup>[29]</sup>。可以看出粉细砂土水合物沉积物表现为塑性破坏;随着围压的增大,试样强度逐渐增大。水合物平均饱和度为 85.3%时,内聚力和内摩擦角分别为 3.1 MPa 和 12.4°。

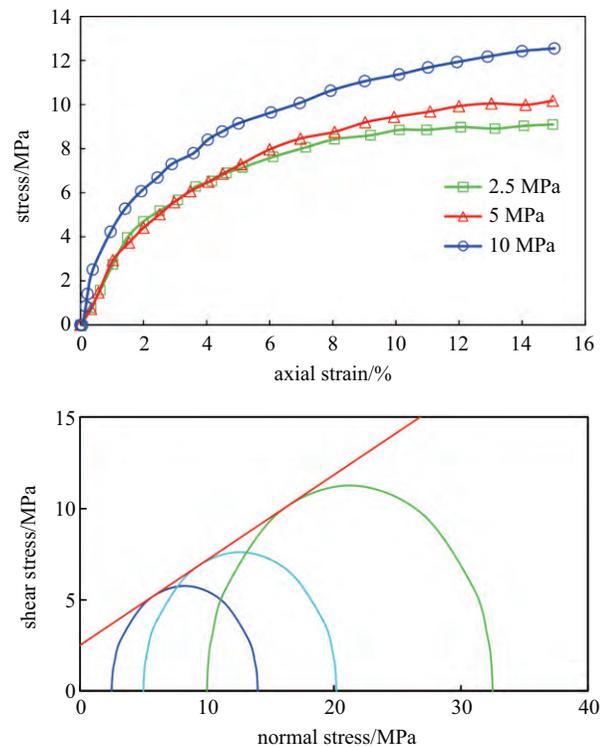


图 4 粉细砂土的应力-应变曲线和摩尔圆<sup>[29]</sup>

Fig. 4 Stress-strain curve and molar circle of fine sand<sup>[28]</sup>

### 1.3 试验设备及步骤

图 5 所示为水合物沉积层水力成缝装置示意图,是在中国科学院力学研究所原有高压三轴仪器基础上改装而成,实验设备包括:ISCO 泵 (0~40 MPa),压力表,阀门,套管、低温室等。低温室可保证实验处于环境温度在 -9°C 下,避免水合物分解和冰融化;ISCO 泵用于向试样内注入高压流体进行水力压裂;压力表记录注入压力随着时间的变化;套管用于连接高压管线和试样,在套管外壁与圆孔内壁间用环

氧树脂封固; 高速摄影用于拍摄样品表面裂缝扩展动态。

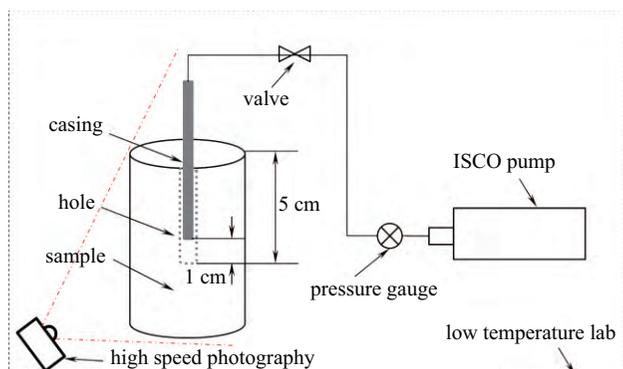


图 5 水合物沉积层水力成缝试验装置示意图

Fig. 5 Schematic diagram of hydraulic fracturing test device for hydrate deposit layer

水合物沉积层水力成缝实验步骤如下:

(1) 取粉质黏土和砂土, 分别制备沉积物骨架试样、水合物沉积物试样和水合物-冰沉积物试样. 并在试样钻 5 cm 深的小孔, 直径约为 1 cm.

(2) 打开温控设备, 确保环境温度在  $-4^{\circ}\text{C}$  以下, 将制备好的样品放置于样品架上; 把圆管置于圆孔内, 保持圆管插入深度约 4 cm, 在圆管下部留出 1 cm 的空间 (图 5);

(3) 按照质量比 3:1 将环氧树脂和固化剂混合均匀, 注入到圆管外壁与圆孔内壁的间隙, 保持 10 h 以上, 直到环氧树脂和固化剂完全固化;

(4) 将圆管连接到高压管线上, 打开阀门, 启动 ISCO 泵, 开始注入高压流体 (室温  $25^{\circ}\text{C}$ ). 逐渐提高泵入压力, 直到试样表面出现裂缝, 压力迅速下降, 即可停止实验.

(5) 取下样品, 观察水力裂缝的形态特点 (位置、方向、条数等); 并将压力表记录的数据拷贝至电脑, 绘制注入压力随着时间的变化曲线.

## 2 实验结果分析

### 2.1 沉积物骨架试样成缝特征

#### 2.1.1 粉质黏土沉积物骨架试样

打开阀门, 将流体注入粉质黏土沉积物骨架试样中, 裂缝迅速扩展, 裂缝形态如图 6 所示. 理论上, 试样的长度是直径的 2 倍, 裂缝水平向扩展的阻力要明显低于垂直向的扩展, 试样压裂倾向于形成水平

裂缝. 然而, 试样压后产生三条裂缝: 两条垂直裂缝和一条水平裂缝. 两条垂直裂缝的缝面与样品端面垂直, 呈  $180^{\circ}$  对称分布, 长度约为样品长度的一半, 缝宽约为 1 mm (图 6(a) 和图 6(b)). 水平裂缝的缝面与样品端面平行, 长度约为样品周长 1/4, 缝宽约为 1 mm (图 6(c)). 此外, 流体主要从裂缝内流出, 且裂缝附近没有形成明显的渗透区, 说明粉质黏土沉积物的渗透率较低.

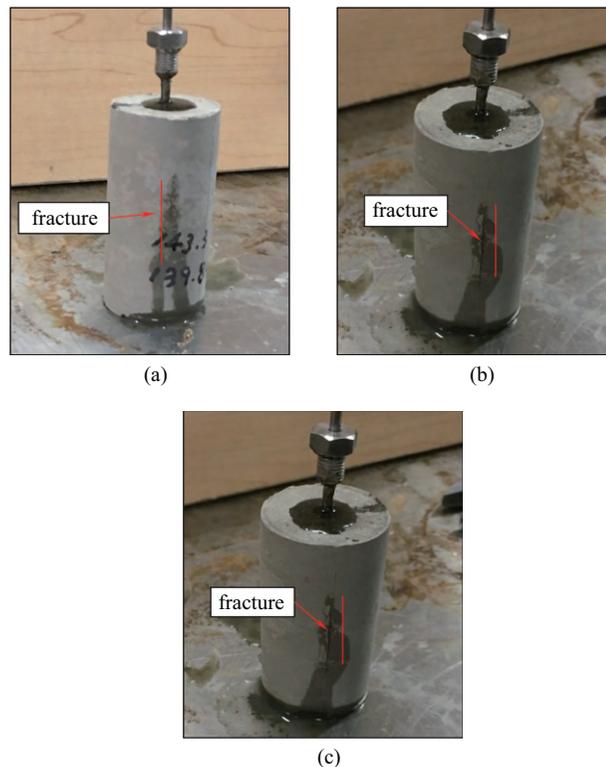


图 6 粉质黏土沉积物骨架试样 (sample 1#) 压裂裂缝形态  
Fig. 6 Fracture morphology of silty clay sediment skeleton sample (sample 1#)

粉质黏土沉积物骨架试样压裂时, 垂直裂缝与水平裂缝同步扩展, 说明水力裂缝的扩展方向性较差. 这与粉质黏土沉积物骨架渗透性较低有关. 在流体压力作用下, 流体进入粉质黏土沉积物骨架内. 由于粉质黏土沉积物渗透率较低, 注入的流体在局部形成高压. 裂缝扩展的阻碍作用影响较小, 因此压裂裂缝处于自由扩展的状态, 不具有明显的方向性. 当流体压力超过样品的抗拉强度时, 就产生了垂直拉伸裂缝和水平拉伸裂缝.

#### 2.1.2 砂土沉积物骨架试样

流体注入砂土沉积物骨架试样中, 引起水力裂缝扩展, 裂缝形态如图 7 所示. 压裂形成的裂缝为水

平缝, 该裂缝平行于样品端面, 呈半圆形分布, 长度约为样品周长的 3/4, 裂缝宽度约为 1~8 mm. 在水平裂缝附近形成了宽度约为 3 cm 的流体渗透区, 说明砂土沉积物骨架的渗透率明显高于粉质黏土沉积物骨架. 此外, 人工将样品掰开后, 发现裂缝面基本处于同一平面内, 然而裂缝表面不光滑, 粗糙度较高, 呈现锯齿形.

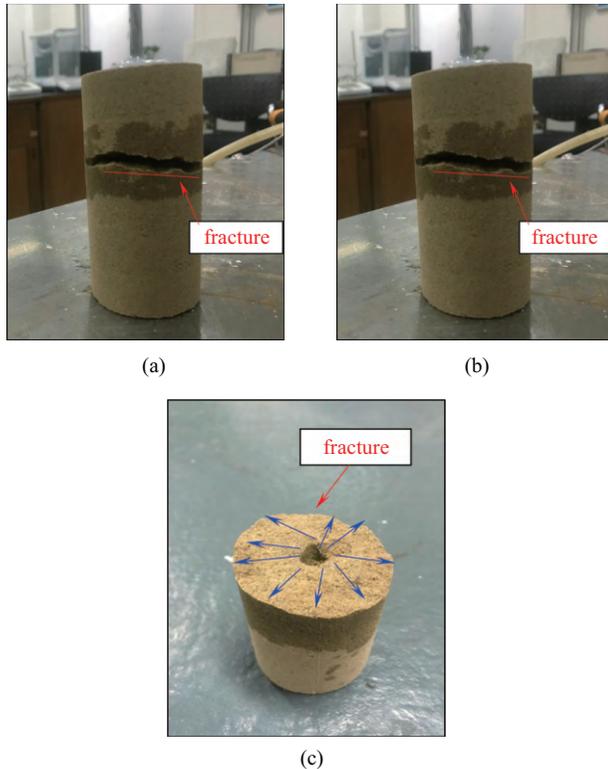


图 7 砂土沉积物骨架试样 (sample 11#) 压裂裂缝形态

Fig. 7 Fracture morphology of sand sediment sample (sample 11#)

相比粉质黏土沉积物, 砂土沉积物骨架的胶结强度和渗透率较高. 在相同流体压力下, 流体迅速渗流进入孔隙中, 降低了缝内压力. 由于砂土沉积物骨架的胶结强度高, 裂缝扩展的阻力效应逐渐显现出来. 裂缝水平向扩展的阻力要明显低于垂直向的扩展, 因此流体在试样内产生垂直于上下端面方向的拉应力, 当拉应力超过样品的抗拉强度时, 水平裂缝就形成了.

### 2.1.3 注入压力特征

图 8 为沉积物骨架试样注入压力随着注入时间的变化. 随着注入时间的延长, 注入压力逐渐增大. 初期压力增速较慢, 后期增速逐渐加快, 最终达到最大压力, 之后压力迅速下降至零. 最大压力点是初始

裂缝延伸的压力, 即为破裂压力. 由于样品尺寸比较小, 裂缝形成后迅速扩展至边界, 因此在压裂压力曲线上看不到裂缝延伸段. 粉质黏土沉积物骨架的破裂压力约为 7.2 kPa, 裂缝开始扩展的时间为 9 s. 砂土质沉积物骨架的破裂压力约为 5.13 kPa, 裂缝开始扩展的时间为 8 s. 相比而言, 粉质黏土沉积物骨架具有较高的破裂压力. 这与砂土沉积物渗透率较高, 吸水后胶结强度明显下降有关.

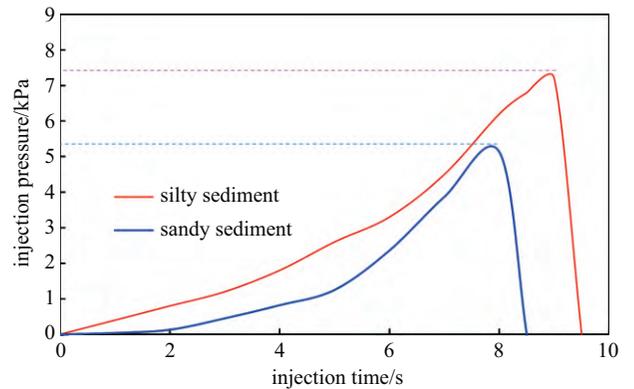


图 8 粉质黏土和砂土沉积物骨架试样压裂压力曲线

Fig. 8 Fracturing pressure curve of skeleton samples of silty clay and sand sediment

## 2.2 水合物沉积物试样成缝特征

### 2.2.1 粉质黏土水合物沉积物试样

与粉质黏土沉积物骨架压裂不同, 高压流体 (5 MPa) 注入粉质黏土水合物沉积物试样后, 样品表面无明显变化; 将流体压力提高至 40 MPa, 仍没有观察到裂缝扩展的现象. 保持 40 MPa 压力, 采用高速摄影机持续观察样品表面变化. 注入时间约 174 s 时, 流体瞬间喷出, 呈 180° 对称形成两条水柱, 喷射时间持续约 1 s, 并产生一条水平裂缝 (图 9). 此外, 水平裂缝平行于样品端面, 几乎完全贯穿整个样品横截面, 裂缝宽度约为 0.5~1 mm. 人工将样品掰开后, 发现裂缝表面较为平整, 基本处于同一平面上, 无明显转向作用, 结果如图 10 所示.

相比粉质黏土沉积物骨架而言, 粉质黏土水合物沉积物的孔隙被水合物占据, 提高了试样的胶结强度、脆性和成缝能力, 裂缝扩展具有明显的方向性. 此外, 水合物赋存于孔隙, 大幅度降低了粉质黏土水合物沉积物的渗透率. 由于渗透性极低, 注入的流体只能局限在注入点附近, 难以诱发裂缝扩展. 随着注入流体与样品长时间接触, 注入点附近水合物

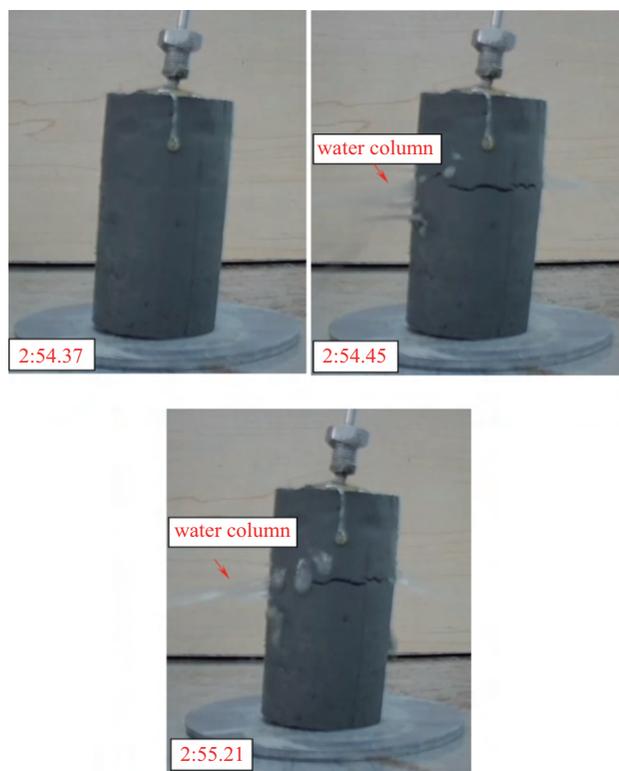


图 9 粉质黏土水合物沉积物试样裂缝扩展动态  
Fig. 9 Dynamics of fracture propagation in silty clay hydrate sediment samples

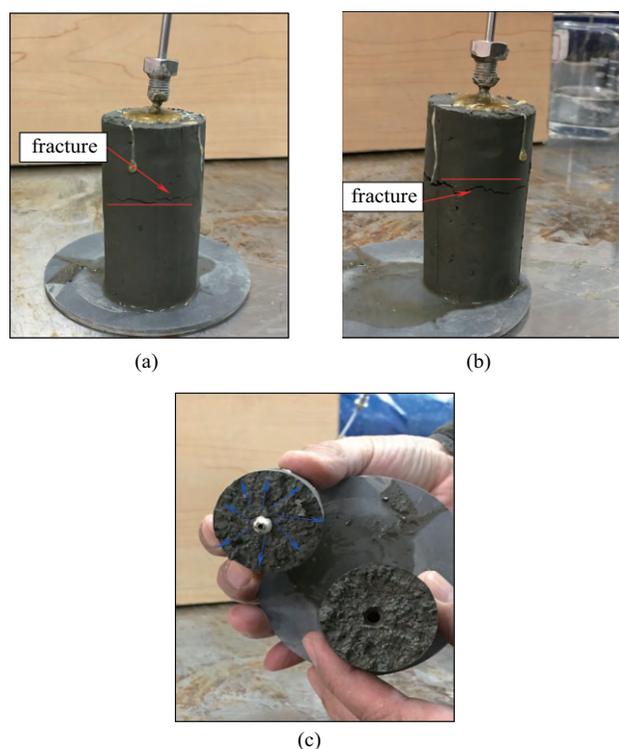


图 10 粉质黏土水合物沉积物试样 (sample 2#) 压裂裂缝形态  
Fig. 10 Fracture morphology of silty clay hydrate sediment sample (sample 2#)

受热分解, 局部渗透性提高, 胶结强度下降, 导致裂缝瞬间扩展, 最终形成水平的拉伸裂缝. 可见, 粉质黏土水合物沉积物的裂缝在流体压力和热应力联合作用下才发生扩展, 具有明显的延迟效应.

## 2.2.2 砂土水合物沉积物试样

流体注入砂土水合物沉积物试样, 引起裂缝扩展, 裂缝形态如图 11 所示. 压裂形成的裂缝为三条垂直裂缝 (相隔  $90^\circ$  左右) 和多条微裂缝, 呈现出裂缝网络形态. 该裂缝垂直于样品端面, 长度约为试样长度的  $1/3$ , 裂缝宽度约为  $0.8\sim 1.2$  cm. 压裂过程中, 流体与砂土的混合物从三条垂直裂缝中流出. 多条微裂缝中并没有发现流体流动.

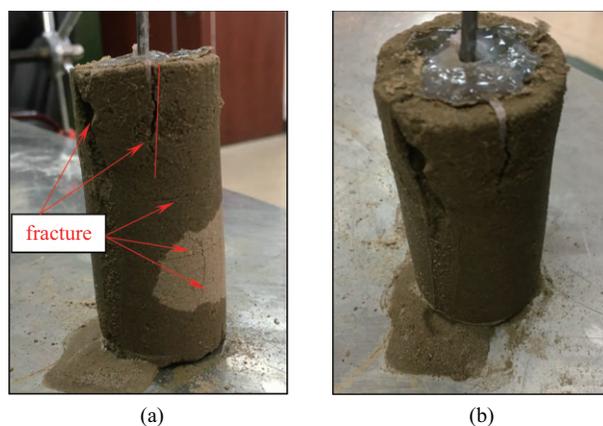


图 11 砂土水合物沉积物试样 (sample 22#) 压裂裂缝形态  
Fig. 11 Fracture morphology of sand hydrate deposit sample (sample 22#)

砂土水合物沉积物试样在低温制备过程中, 由于水合物膨胀产生了大量的微裂缝. 当流体在高压作用下注入试样中, 迅速进入微裂缝中, 诱发微裂缝张开、连接和贯穿, 最终形成网络结构, 可大幅度改善砂土水合物沉积层的导流能力. 然而, 由于砂土水合物沉积物的砂粒容易剥落, 与流体混合后, 形成固液两相流动, 易堵塞裂缝, 导致井底大范围出砂, 对甲烷的产出带来不利影响.

## 2.2.3 注入压力特征

图 12 为水合物沉积物试样注入压力随着注入时间的变化. 对于砂土水合物沉积物而言, 注入压力随着时间迅速增大, 达到破裂压力后, 压力迅速下降至 0. 破裂压力约为  $4.272$  MPa, 高于砂土沉积物骨架的破裂压力 ( $5.13$  kPa). 可见, 水合物的存在提高了沉积物的胶结强度, 一定程度上提高了破裂压力.

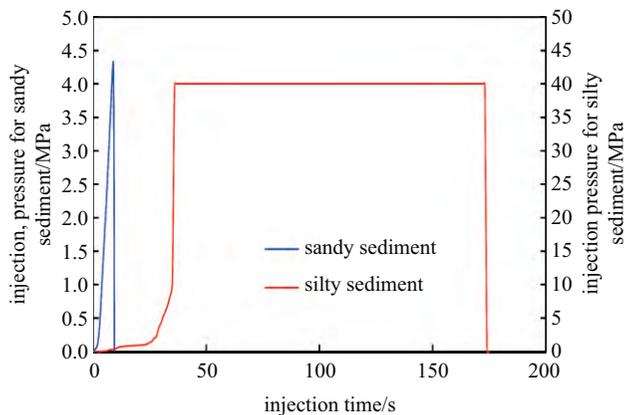


图 12 粉质黏土和砂土水合物沉积物试样压裂压力曲线  
Fig. 12 Fracturing pressure curve of silty clay and sand hydrate sediment samples

粉质黏土水合物沉积物试样的压力曲线具有明显的三段式特征. 初期段, 注入压力随着时间迅速增大, 达到 40 MPa 后, 试样内没有出现微裂缝. 中期段, 注入压力处于恒定状态, 约为 40 MPa, 说明试样渗透率极低, 流体几乎不发生渗流, 从而保持压力一定稳定. 后期段, 水合物逐渐分解, 水平裂缝迅速贯穿试样横截面, 而注入压力迅速下降至零. 根据压力曲线可以推测, 粉质黏土水合物沉积层压力过程中, 极有可能产生较高的施工压力. 适当延长注入时间, 保持流体与沉积层充分接触, 会起到加热水合物沉积层和引起水合物分解的作用, 在一定程度上可降低破裂压力. 经过多次实验, 粉质黏土水合物沉积物试样的破裂压力存在较大不确定性, 大约为 10~40 MPa. 这可能与粉质黏土沉积物复杂的微观非均质性有关, 低压力传递能力易形成局部高压. 此外, 水合物形成对孔隙结构的影响可能具有一定随机性, 进而导致不同的破裂压力, 其微观控制机理有待于进一步研究.

## 2.3 水合物冰沉积物试样成缝特征

### 2.3.1 粉质黏土水合物-冰沉积物试样

水合物-冰沉积物试样是在水合物沉积物外表覆盖 1 cm 厚的冰层, 用于模拟地质特征极其复杂的水合物沉积层. 流体注入粉质黏土水合物-冰沉积物试样后, 裂缝迅速扩展, 裂缝形态如图 13 所示. 压裂形成的裂缝整体呈现为一条水平缝, 然而裂缝面并不平直, 存在较大程度的转向(图 13(b)). 水平裂缝几乎完全贯穿整个试样, 裂缝长度约等于试样周长. 裂缝处于闭合状态, 缝宽小于 1 mm.

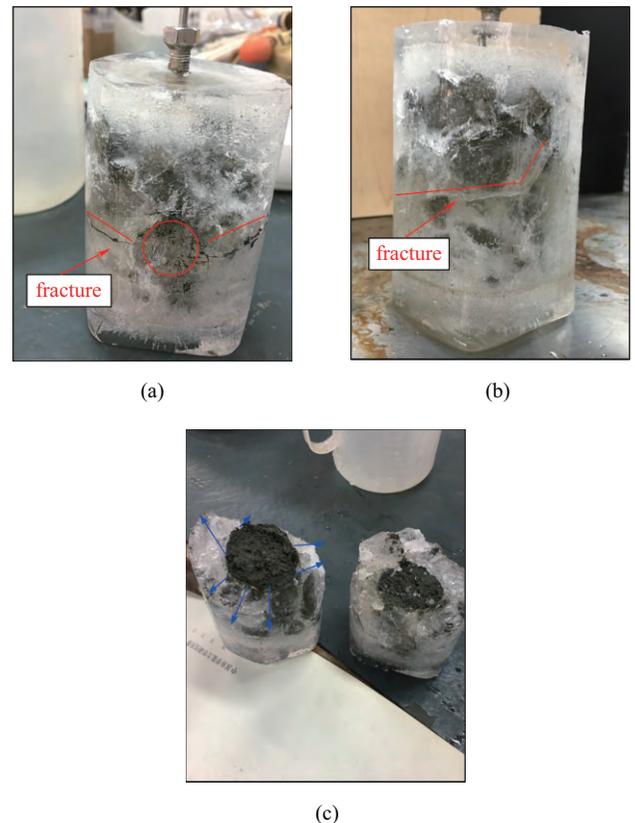


图 13 粉质黏土水合物冰沉积物试样 (sample 3#) 压裂裂缝形态  
Fig. 13 Fracture morphology of silty clay hydrate sediment sample (sample 3#)

从图 13(a) 和图 13(b) 可以看出, 冰层非均质性较强, 广泛发育弱面、孔洞等等, 这是水裂缝发生转向的主要原因. 由于水合物沉积物表面覆盖冰层, 极大地提高了整体的胶结强度. 冰层的脆性指数较高, 可以提高水合物沉积物的成缝能力. 水合物与冰同时存在, 倾向于产生复杂裂缝.

### 2.3.2 砂土水合物-冰沉积物试样

砂土和粉质黏土水合物-冰沉积物试样压裂形态特征基本一致, 结果如图 14 所示. 压裂形成的裂缝整体呈现水平形态, 局部区域出现分叉裂缝. 裂缝面不平直, 转向特征明显. 水平缝基本上贯穿了整个试样, 缝长约等于试样周长. 与不含冰层的砂土水合物沉积物试样相比, 裂缝扩展具有较好的方向性, 倾向于形成单一的水平裂缝, 不利于裂缝网络的形成. 这是由于冰层的存在, 很大程度上限制了水合物膨胀, 影响了微裂缝的形成. 总的来看, 砂土和粉质黏土水合物-冰沉积物试样压裂形态特征主要取决于冰层的强度和均质性.

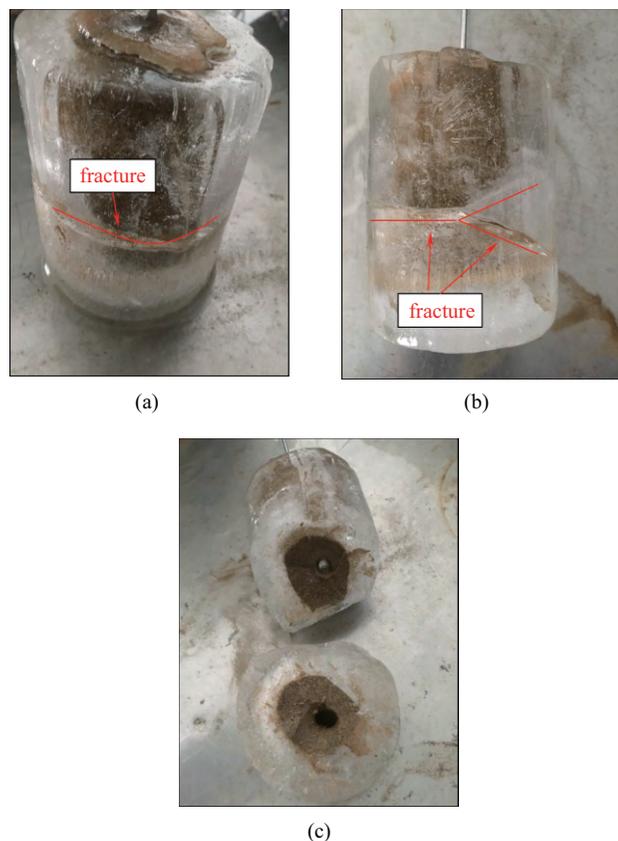


图 14 砂土水合物冰沉积物试样 (sample 33#) 压裂裂缝形态  
Fig. 14 Fracture morphology of sand hydrate-ice sediment sample (sample 33#)

### 2.3.3 注入压力特征

图 15 为粉质黏土和砂土水合物-冰沉积物试样压裂压力曲线。随着注入时间的延长,注入压力逐渐增大。初期压力增速较慢,后期增速逐渐加快,最终达到最大压力,之后压力迅速下降至零。粉质黏土水合物-冰沉积物试样的破裂压力约为 25.2 MPa,裂缝

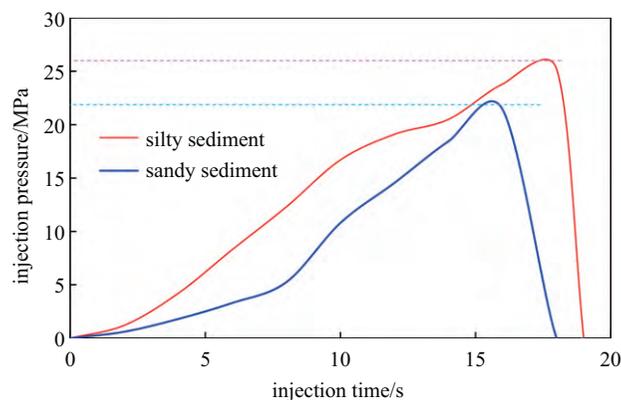


图 15 粉质黏土和砂土水合物冰沉积物试样压裂压力曲线  
Fig. 15 Fracturing pressure curve of silty clay and sand hydrate-ice sediment sample

开始扩展的时间为 18 s。砂土水合物-冰沉积物试样的破裂压力约为 21.4 MPa,裂缝开始扩展的时间为 16 s。相比而言,粉质黏土水合物-冰沉积物试样具有较高的破裂压力。事实上,两者之间的破裂压力差别不大,且压裂压力曲线形态有很大相似性。说明当冰层存在时,压裂特征主要取决于冰层的性质,而沉积物骨架的性质影响较小。

### 2.4 骨架、水合物及水合物冰沉积物试样成缝试验结果对比

本文中土骨架试样成分为粉质黏土和粉细砂土,水合物沉积物试样由四氢呋喃水合物与土骨架组成,水合物-冰沉积物试样由四氢呋喃水合物、冰层和土骨架。表 2 给出了不同土质的沉积物骨架试样、水合物沉积物试样和水合物-冰沉积物试样的强度及成缝能力参数。其中,由于水合物-冰沉积物试样难以开展高压三轴力学实验,无法测量强度参数。考虑到水合物-冰沉积物与冰、冰沉积物有相似性,本文分别采用河冰和冰沉积物的强度参数来代替粉质黏土和粉细砂土水合物-冰沉积物试样的强度参数,作为定性分析的依据。从表 2 中可以看出:

(1) 含水合物的沉积物比不含水合物的骨架的内聚力高了几倍以上,水合物与骨架粘结,使得颗粒间得胶结强度提高。水合物的存在提高了粉质黏土的内摩擦角,但是降低了粉细砂土的内摩擦角。可见,水合物没有改善颗粒表面的粗糙度和滑动摩擦,与内摩擦角没有必然关系。

(2) 对于相同土质的沉积物而言,水合物-冰沉积物的破裂压力最高,水合物沉积物次之,沉积物骨架最低。从总体趋势来看,破裂压力与内聚力呈正相关关系。高内聚力的沉积物具有较高的颗粒间胶结强度,在一定程度上阻碍了拉伸裂缝的扩展,从而提高了破裂压力。

(3) 对于不同土质的沉积物而言,粉质黏土沉积物的破裂压力总体高于砂土沉积物。这与粉质黏土沉积物特殊的应力-应变和低渗透特征有关。当粉质黏土沉积物应变高于 6%时,粉质黏土试样强度迅速上升,呈现应变强化的特征,对水力拉伸裂缝的扩展具有一定的阻碍作用。此外,粉质黏土沉积物颗粒粒径小,渗透性差,使得水力难以通过渗透作用迅速传递压力,从而提高了沉积层的破裂压力。

(4) 水合物和冰的存在提高了沉积物的成缝能

表 2 试样的强度参数及成缝特征

Table 2 Strength parameters and hydraulic fracture characteristics

Sample	Component	Cohesion/MPa	Friction angle/(°)	Breakdown pressure/MPa	Fracture shape
sediment skeleton	silty	0.04	0.5	0.0072	vertical and horizontal
	sandy	0	33	0.00513	horizontal
hydrate sediment	silty	0.3	2.21	40 <sup>c</sup>	horizontal
	sandy	3.1	12.4	4.272	complex
hydrate-ice sediment	silty	0.93 <sup>a</sup>	52 <sup>a</sup>	25.2	horizontal and twist
	sandy	2.85 <sup>b</sup>	9.6 <sup>b</sup>	21.4	horizontal and twist

注: <sup>a</sup> 在恒温 -24°C 条件下, 测得河冰的内聚力和内摩擦角<sup>[39]</sup>; <sup>b</sup> 冰饱和度为 85% 条件下, 测得的冰沉积物的内聚力和内摩擦角 (冰沉积物合成条件: 温度 -9°C 和压力 2.5 MPa)<sup>[30]</sup>; <sup>c</sup> 多次实验结果显示, 粉质黏土水合物沉积物试样的破裂压力存在较大不确定性 (大约 10~40 MPa), 这很大程度上与粉质黏土沉积物的特殊微观结构有关。

力。此外, 裂缝受冰层非均质性影响, 扩展过程中会出现转向, 容易出现复杂裂缝。相比砂土沉积物而言, 粉质黏土沉积物在水力作用下裂缝扩展方向性较好, 成缝能力强。而砂土沉积物在水力作用下, 颗粒容易脱落, 进而发生“流土”现象, 不利于裂缝的形成。

通过以上对比研究可以看出, 土质、水合物和冰饱和度对沉积层的力学强度及成缝能力参数所起的作用差别很大。此外, 水力成缝能力不仅仅取决于力学强度, 还与沉积物本身的渗透性和传热性有关。本文的压裂实验是在无围压条件下开展的, 并不能完全反映实际地层的裂缝扩展规律。在常规三轴和真三轴条件下, 裂缝的破裂压力会明显提高, 裂缝扩展方向很大程度上会与最小主应力的方向垂直。在以后的研究中, 需要深化围压条件下的水合物沉积层裂缝扩展方面的研究。

综合来看, 虽然水合物沉积层与页岩地层具有一定相似性, 但是裂缝扩展机理存在较大不同。水合物沉积层的水力裂缝在温度场、应力场、化学场和渗流场共同作用下扩展, 同时伴随着水合物的相变和孔隙结构的剧烈变化。因此, 传统的水力压裂技术难以直接应用于水合物沉积层的开采。

### 3 结 论

本文针对沉积物骨架试样、水合物沉积物试样和水合物-冰沉积物试样开展压裂对比试验, 研究了不同沉积物的压裂裂缝扩展形态和破裂压力, 阐明了沉积物骨架性质、水合物和冰对水力裂缝形态的控制作用。得出的结论如下:

(1) 粉质黏土和砂土沉积层总体上呈现相似的压

裂特征, 沉积物骨架破裂压力较低, 水合物和冰层的存在能够提高破裂压力。尤其是当冰层存在时, 压裂特征主要取决于冰层的性质, 而沉积物的骨架性质影响较小。裂缝受冰层非均质性影响, 扩展过程中会出现转向, 容易出现复杂裂缝。

(2) 粉质黏土和砂土沉积层的压裂裂缝形态存在较大不同。对于沉积物骨架试样而言, 粉质黏土沉积物骨架同时产生垂直裂缝和水平裂缝, 而砂土沉积物骨架产生了水平裂缝; 对于水合物沉积物试样而言, 粉质黏土水合物沉积物形成了水平裂缝, 而砂土水合物沉积物产生了缝网; 对于水合物-冰沉积物试样, 两者都形成了水平裂缝, 且呈现出明显的转向特征, 裂缝复杂度较高。

(3) 水合物沉积物地层压裂过程中, 裂缝在流体压力和热应力联合作用发生扩展, 具有明显延迟效应。适当延长注入时间, 保持流体与沉积层充分接触, 会起到加热水合物沉积层和引起水合物分解的作用, 在一定程度上可降低破裂压力。

### 参 考 文 献

- 1 Kvenvolden KA, Lorenson TD. The global occurrence of natural gas hydrate. *Geophysical Monograph*, 2001, 124: 3-18
- 2 刘乐乐, 张旭辉, 刘昌岭等. 含水合物沉积物三轴剪切试验与损伤统计分析. *力学学报*, 2016, 48(3): 720-729 (Liu Lele, Zhang Xuhui, Liu Changling, et al. Triaxial shear tests and statistical analyses of damage for methane hydrate-bearing sediments. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2016, 48(3): 720-729 (in Chinese))
- 3 Silva JMD, Dawe R. Towards commercial gas production from hydrate deposits. *Energies*, 2011, 4: 215-238
- 4 石要红, 张旭辉, 鲁晓兵等. 南海水合物黏土沉积物力学特性试验模拟研究. *力学学报*, 2015, 47(3): 521-528 (Shi Yaohong, Zhang

- Xuhui, Lu Xiaobing, et al. Experimental study on the static mechanical properties of hydrate-bearing silty-clay in the South China Sea. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2015, 47(3): 521-528 (in Chinese)
- 5 徐海良, 林良程, 吴万荣等. 海底天然气水合物绞吸式开采方法研究. 中山大学学报(自然科学版), 2011, 50(3): 48-52 (Xu Hailiang, Lin Liangcheng, Wu Wanrong, et al. Study on the method of seabed gas condensate suction mining. *Journal of Sun Yat-sen University (Natural Science Edition)*, 2011, 50(3): 48-52 (in Chinese))
- 6 Matsukuma Y, Miwa M, Inoue G, et al. Study of recovery system of methane hydrate using gas lift method//Proceedings of the 6th International Conference on Gas Hydrates, Vancouver, British Columbia, Canada, July 6-10, 2008
- 7 Sloan ED. *Clathrate Hydrates of Natural Gases*. New York: Marcel Dekker, 1998.
- 8 Ginsburg GD, Soloviev VA. Methane migration within the submarine gas-hydrate stability zone under deep-water conditions. *Mar Geol*, 1997, 137: 49-57
- 9 祝有海, 吴必豪, 卢振权. 中国近海天然气水合物找矿前景. 矿床地质, 2001, 2: 174-180 (Zhu Youhai, Wu Bihao, Lu Zhenquan. Prospects for gas hydrate prospecting in offshore China. *Deposit Geology*, 2001, 2: 174-180 (in Chinese))
- 10 祝有海, 张永勤, 文怀军等. 祁连山冻土区天然气水合物及其基本特征. 地球学报, 2010, 31: 7-16 (Zhu Youhai, Zhang Yongqin, Wen Huaijun, et al. Natural gas hydrates and their basic characteristics in the frozen soil of Qilian Mountains. *Earth Journal*, 2010, 31: 7-16 (in Chinese))
- 11 金春爽, 汪集旸, 张光学. 南海天然气水合物稳定带的影响因素. 矿床地质, 2005, 24: 388-397 (Jin Chunshuang, Wang Jizhen, Zhang Guang. Influencing factors of gas hydrate stability zone in the South China Sea. *Deposit Geology*, 2005, 24: 388-397 (in Chinese))
- 12 Moridis GJ, Sloan ED. Gas production potential of disperse low-saturation hydrate accumulations in oceanic sediments. *Energy Convers Manage*, 2007, 48: 1834-1849
- 13 Moridis GJ, Reagan MT. Gas production from Class 2 hydrate accumulations in the permafrost//Proceedings of SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Anaheim, 2007
- 14 McGuire PL. Recovery of gas form hydrate deposits using conventional technology//SPE Unconventional Gas Recovery Symposium, Pittsburgh, 1982
- 15 Yousif MH, Abass HH, Selim MS, et al. Experimental and theoretical investigation of methane-gas-hydrate dissociation in porous media. *SPE Reservoir Eng*, 1991, 6: 69-76
- 16 张旭辉, 鲁晓兵, 李鹏. 天然气水合物开采方法的研究综述. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2019, 49(3): 38-59 (Zhang Xuhui, Lu Xiaobing, Li Peng. Summary of research on natural gas hydrate mining methods. *Chinese Science: Physics Mechanics Astronomy*, 2019, 49(3): 38-59 (in Chinese))
- 17 王屹, 李小森. 天然气水合物开采技术研究进展. 新能源进展, 2013, 1(1): 69-79 (Wang Wei, Li Xiaosen. Research progress in natural gas hydrate mining technology. *Advance in New Energy*, 2013, 1(1): 69-79 (in Chinese))
- 18 张旭辉, 鲁晓兵. 一种新的海洋浅层水合物开采法 - 机械 - 热联合开采法. 力学学报, 2016, 48(5): 1238-1246 (Zhang Xuhui, Lu Xiaobing. A new method for mining shallow ocean hydrates-mechanical-thermal combined mining method. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2016, 48(5): 1238-1246 (in Chinese))
- 19 吴传芝, 赵克斌, 孙长青等. 天然气水合物开采技术研究进展. 地质科技情报, 2016, 35(6): 243-250 (Wu Chuanzhi, Zhao Kebin, Sun Changqing, et al. Research progress in natural gas hydrate mining technology. *Geological Science and Technology*, 2016, 35(6): 243-250 (in Chinese))
- 20 郑哲敏. 关于天然气水合物开发工程科学研究的一点认识. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2019, 49: 034601 (Zheng Zhemín. A little understanding of scientific research on natural gas hydrate development engineering. *Chinese Science: Astronomy in Physics and Mechanics*, 2019, 49: 034601 (in Chinese))
- 21 邵茹. 利用成对井配合水力压裂技术开采天然气水合物. 科学与技术, 2014(6): 277-278 (Shao Ru. Production of natural gas hydrate by using paired wells combined with hydraulic fracturing technology. *Science and Technology*, 2014(6): 277-278 (in Chinese))
- 22 祝道平, 宁正福. 利用高能气体压裂技术开采天然气水合物可行性分析. 重庆科技学院学报: 自然科学版, 2009, 11(3): 37-39 (Zhu Daoping, Ning Zhengfu. Feasibility analysis of mining natural gas hydrate using high energy gas fracturing technology. *Journal of Chongqing University of Science and Technology: Natural Science Edition*, 2009, 11(3): 37-39 (in Chinese))
- 23 Hunter RB, Collett TS, Boswell R, et al. Mount Elbert Gas Hydrate Stratigraphic Test Well, Alaska north slope: Overview of scientific and technical program. *Marine and Petroleum Geology*, 2011, 28(2): 295-310
- 24 王屹, 李小森. 天然气水合物开采技术研究进展. 新能源进展, 2013, 1(1): 69-79 (Wang Wei, Li Xiaosen. Research progress in natural gas hydrate mining technology. *Advance in New Energy*, 2013, 1(1): 69-79 (in Chinese))
- 25 李栋梁, 樊栓狮. 天然气水合物资源开采方法研究. 化工学报, 2003(S1): 108-112 (Li Dongliang, Fan Shuanshi. Study on mining method of natural gas hydrate resources. *Journal of Chemical Industry and Engineering (China)*, 2003(S1): 108-112 (in Chinese))
- 26 鲁晓兵, 张旭辉, 王淑云. 天然气水合物开采相关的安全性研究进展. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2019, 49(3): 7-37 (Lu Xiaobing, Zhang Xuhui, Wang Shuyun. Research progress on safety related to natural gas hydrate exploitation. *Chinese Science: Physics Mechanics Astronomy*, 2019, 49(3): 7-37 (in Chinese))
- 27 Lu XB, Zhang XH, Wang SY. Advances in study of mechanical properties of gas hydrate bearing sediments. *The Open Ocean Engineering Journal*, 2013, 6: 26-40
- 28 王淑云, 罗大双, 张旭辉等. 含水合物黏土的力学性质试验研究. 实验力学, 2018, 33(2): 245-252 (Wang Shuyun, Luo Dashuang, Zhang Xuhui, et al. Experimental study on mechanical properties of hydrated clay. *Laboratory Mechanics*, 2018, 33(2): 245-252 (in Chinese))
- 29 张旭辉, 王淑云, 李清平等. 天然气水合物沉积物力学性质的试验研究. 岩土力学, 2010, 31(10): 3069-3074 (Zhang Xuhui, Wang Shuyun, Li Qingping. Experimental study on mechanical properties of natural gas hydrate deposits. *Rock and Soil Mechanics*, 2010, 31(10): 3069-3074 (in Chinese))
- 30 韩红卫, 解飞, 汪恩良等. 河冰三轴压缩强度特性及破坏准则试验研究. 水利学报, 2018, 49(10): 1199-1205 (Han Hongwei, Xie Fei, Wang Enliang, et al. Experimental study on triaxial compression strength characteristics and failure criteria of river ice. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2018, 49(10): 1199-1205 (in Chinese))